

变速抽水蓄能机组的快速调频能力与动态特性分析

杨桂兴^{1,2}, 郭小龙¹, 常喜强¹, 亢朋朋¹, 宋鹏飞¹, 颜勤³

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要:与定速抽水蓄能机组相比, 变速抽水蓄能机组可以通过调节机组转速实现灵活功率调节, 并在不同工况下运行时均具备调频能力。为充分对比分析定速与变速抽水蓄能机组的快速调频能力与动态特性, 首先, 建立了包含调频功能模块的全阶双馈变速抽水蓄能装置模型; 其次, 分析了变速抽水蓄能机组在不同工况下的控制与运行特性; 最后, 通过基于三机九线系统的动态仿真实验对比分析了定速与变速抽水蓄能机组的调频能力与动态特性。仿真结果表明, 通过有功功率下垂控制, 抽水蓄能机组可以在发电和抽水工况下为系统提供快速频率调节, 且变速抽水蓄能的调频能力优于定速抽水蓄能性能。

关键词:变速抽水蓄能机组; 单机无穷大系统; 快速调频; 下垂控制

中图分类号: TM 612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0038-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250206

Analysis on Fast Frequency Regulation Capability and Dynamic Characteristics of Variable-speed Pumped Storage Units

YANG Guixing^{1,2}, GUO Xiaolong¹, CHANG Xiqiang¹, KANG Pengpeng¹, SONG Pengfei¹, YAN Qin²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, Xinjiang, China; 2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan, China)

Abstract: Compared with fixed-speed pumped storage units, variable-speed pumped storage units can achieve a flexible power adjustment by regulating the speed of units, and have frequency regulation capability under different operating conditions. In order to fully compare and analyze the fast frequency regulation capability and dynamic characteristics of fixed-speed and variable-speed pumped storage units, firstly, a model of full-order doubly-fed variable-speed pumped storage model including frequency regulation function module is established. Secondly, the control and operation characteristics of variable-speed pumped storage units under different operating conditions are analyzed. Finally, through the dynamic simulation experiment based on three-machine nine-wire system, the frequency regulation capability and dynamic characteristics of fixed-speed and variable-speed pumped storage units are compared and analyzed. The simulation results show that the pumped storage unit can provide fast frequency regulation for the system under power generation and pumping conditions through active droop control, and the frequency regulation capability of variable-speed pumped storage units is better than that of fixed-speed pumped storage units.

Key words: variable-speed pumped storage units; stand-alone infinity system; fast frequency regulation; droop control

0 引言

随着新型电力系统的建设, 以风电、光伏为代表

的新能源大规模并网, 并不断取代同步机组成为系统常规电源。在此情况下, 由于新能源存在间歇性、随机性、非同步特性, 导致电力系统的安全稳定性面临严峻挑战, 调峰调频灵活性资源不足^[1]。抽水蓄

能机组由于其技术成熟、运行可靠且较为经济等优势已成为促进新型电力系统新能源消纳的重要装备^[2]。目前,最常见的抽水蓄能机组仍运行于恒转速状态,不能全范围发电,轻载时效率降低、频率支撑能力弱且在发电工况下机组响应缓慢^[3]。文献[4]通过将固定转速抽水蓄能装置改造成可调速度装置来克服上述恒转速运行的缺点。双馈变速抽水蓄能机组采用双馈感应电动机,根据机组运行工况可作为发电机或电动机,在电网出现功率不平衡时,通过机侧变流器控制双馈电机迅速调节机组功率,为系统提供快速频率支撑,以降低新能源出力波动所引发的电网频率失稳问题,提高电网频率稳定性^[5]。

目前,国内关于双馈变速抽水蓄能机组的研究主要集中在机组模型构建^[6-7]。机组运行自启动^[8]、不同运行工况之间的相互转换、功率解耦控制^[9]以及各种故障状态下机组的运行控制^[10-12]等,但有关双馈变速抽水蓄能机组直接参与电网频率快速调节的研究较少。文献[13]仅介绍了运行在发电工况下的双馈变速抽水蓄能机组参与电网的一次调频特性。由于导叶阀门本身具有机械延迟特性,通过将功率前馈控制加入到水泵水轮机的转速调节器中,提升了导叶阀门的机械调节速度,减少了水泵水轮机输出机械力矩的响应时间。文献[14]研究了在风电出力波动时使用双馈变速抽水蓄能机组平抑的控制策略,使系统产生的频率偏差明显减小。文献[15]为提高双馈抽水蓄能机组参与系统调频能力,通过转子动能与导叶开度协调控制提高了机组频率响应能力和电网的风电消纳能力。文献[16]在基于对机组多控制模式振荡特性和功频响应特性的分析,提出了变速抽水蓄能机组在发电工况下快速频率控制与快速功率控制相结合的协调控制策略,以及在水泵工况下定导叶开度变转速控制策略,并应用于中国第一台全功率变速抽水蓄能机组启动调试中,验证了该控制策略的有效性。

为弥补当前变速抽水蓄能机组在快速频率支撑功能研究中存在的不足,构建了能准确反映快速调频特性的双馈变速抽水蓄能机组动态模型,并分析了变速抽水蓄能机组快速频率支撑的工作原理与动态过程,并在此基础上对比分析了定速与双馈变速抽水蓄能机组的控制响应特性、不同工况下的动态运行特性及其对系统的快速频率支撑效果。

1 双馈变速抽水蓄能机组建模

1.1 双馈变速抽水蓄能机组拓扑结构

双馈变速抽水蓄能机组主要包括水力、机械和电气以及控制等部分,水力、机械部分主要包括引水系统、可逆水泵水轮机和导叶伺服机构,电气部分主要包括双馈感应电机、网侧变流器和机侧变流器。其中:机组的机侧变流器与双馈电机的转子连接,通过调节输入到电机转子电流角速度进而控制电机的转子转速和电磁转矩等物理量;网侧变流器用于维持直流母线电压的稳定;可逆水泵水轮机通过转轴与双馈感应电机的转子连接,进行机械功率与电磁功率转换,机组工作在发电工况和抽水工况下分别向电网输入和吸收功率。双馈可变速抽水蓄能机组拓扑如图1所示。

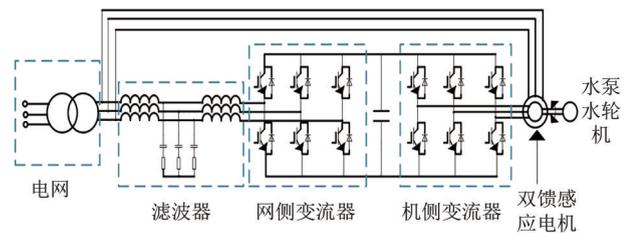


图1 双馈可变速抽水蓄能机组拓扑

1.2 双馈感应电机动态模型

双馈感应电机定、转子都取电动机惯例,将电机定、转子电压方程转化到 dq 轴上进行表示,双馈感应电机的 dq 轴等效电路如图2所示。

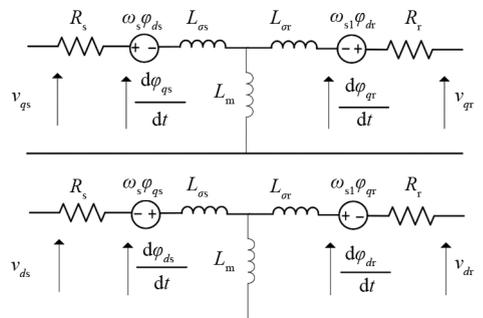


图2 双馈感应电机的 dq 轴等效电路

定、转子电压方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ_{ds} 、 φ_{qs} 、 φ_{dr} 、 φ_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴磁链; v_{ds} 、 v_{qs} 、 v_{dr} 、 v_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴电压; R_s 、 R_r 为定、转子电阻; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别为定、转子转化到 d 轴、 q 轴电流; ω_s 为同步角速度; ω_r 为转子角速度。

定、转子的磁链方程为:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_s = L_{ls} + L_m \\ L_r = L_{lr} + L_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_s 、 L_r 分别为定、转子电感; L_{ls} 、 L_{lr} 为分别为定、转子绕组漏感; L_m 为定、转子绕组之间的互感。

转子的机械运动方程为

$$\begin{cases} \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L \\ T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: J 为转子转动惯量; T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和机械转矩; n_p 为电机的极对数。

机组选用基于定子磁链定向控制策略时,将定子磁链定位到 d 轴,则在 q 轴上磁链分量为 0,定子磁链方程转化为

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)、(2)、(6)可得电磁转矩为

$$T_e = -\frac{3n_p L_m \varphi_{ds} i_{qr}}{2L_s} \quad (8)$$

转子电压方程可转化为

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \sigma L_r \omega_{sl} i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \sigma L_r \omega_{sl} i_{dr} + \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} i_m \\ \varphi_{ds} = L_m i_m \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_m 为通用励磁电流; σ 为漏磁系数; ω_{sl} 为同步角速度与转子角速度之间的滑差。

根据式(8)可知,当 d 轴上定子磁链的幅值不变时,电磁转矩的变化仅与转子电流 q 轴分量有关,机组定子侧的有功功率可由电磁转矩和转子角速度两者的乘积表示,进而将转子电流的 q 轴分量视为定子侧的有功电流。因此双馈变速抽水蓄能机组可根据运行工况分别选取转速、有功功率以及电磁转矩作为机组的控制目标,进而对有功电流进行控制,以保证机组稳定运行。

1.3 可逆水泵水轮机动态模型

在发电工况下水泵水轮机主要包括转速调速器、导叶开度调节器、引水系统以及水轮机模型,引水系统压力管道假设为一个刚性管道。发电工况下的水泵水轮机模型如图 3 所示,可表示为

$$\begin{cases} \sqrt{H} = \frac{G_1}{Q} \\ Q_{nl} = \frac{1 - H - f_p Q^2}{T_w} \\ P_m = A_t H (Q - Q_{nl}) - D G_1 \Delta\omega \end{cases} \quad (10)$$

式中: G_1 为导叶开度; H 为水头; Q 为引水管道中的水流量; f_p 为水头损失系数; T_w 为水流惯性时间常数; A_t 为比例系数; Q_{nl} 为空载流量; D 为水轮机阻尼系数; $\Delta\omega$ 为机组转速变化量; P_m 为水轮机输出机械功率。

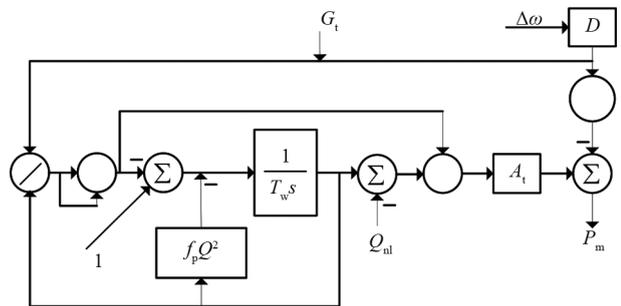


图 3 发电工况下的水泵水轮机模型

双馈变速抽水蓄能机组工作在抽水工况下水泵模型与发电工况时水轮机模型略有不同。发电工况下水泵水轮机的导叶阀门是速度和水头的函数,如式(10)所示,而在抽水工况水泵模型中,工作时通常将导叶阀门完全打开以防止由于节流效应而造成的任何能量损失,水流速度 Q 是水头 H 和机组

2.2 抽水工况下的快速调频

由于在抽水工况下机组的主要功能是提供频率调节和功率参考跟踪,而不是提高效率,将频率的偏差整定为有功功率的附加指令,通过机侧转换器控制跟随参考功率。水泵模式下导叶阀门完全打开,以防止由于节流而造成的任何能量损失。抽水工况下的调频控制框图如图 6 所示。

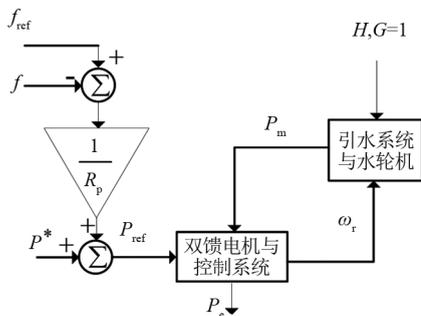


图 6 抽水工况下的频率控制

3 案例分析

3.1 变速抽水蓄能机组控制与运行特性分析

为分析变速抽水蓄能机组的运行特性,现将所构建的双馈变速抽水蓄能机组模型接入单机无穷大等值系统,并通过仿真实验分析变速抽水蓄能机组追踪给定的控制参考值的能力。

图 7、图 8 分别为发电和抽水工况下给定系统功率参考值时的跟踪结果。如图 7(a)所示,发电工况下,机侧变流器优先控制有功功率。当机组给定的有功功率参考值发生变化时,机侧变流器迅速响应控制双馈电机发出功率快速跟踪参考值,系统输出功率值与参考值重叠,展现出了良好的瞬时跟踪能力。图 7(b)为放大后的功率跟随参考值的动态响应过程,当参考值变化时,机侧变流器响应参考值变化时可在 0.15 s 内跟踪到参考值。图 7(c)显示了变速抽水蓄能机组输出参考功率时水轮机组输出的机械功率,水轮机组输出功率始终与变速抽水蓄能机组输出功率之间存在差值,这是由于变速抽水蓄能机组中也存在功率损耗。图 7(d)显示了机组转速由 PID 调速器控制时的最优速度的跟踪性能,可以看到 PID 调节器在每个设定点上均能很好地跟踪最优转速。这里需要注意的重要一点是,机械功率的偏差并不影响电力输出,因为转轴的惯性补偿了缓慢的机械响应。此外,机械功率相对于参考值

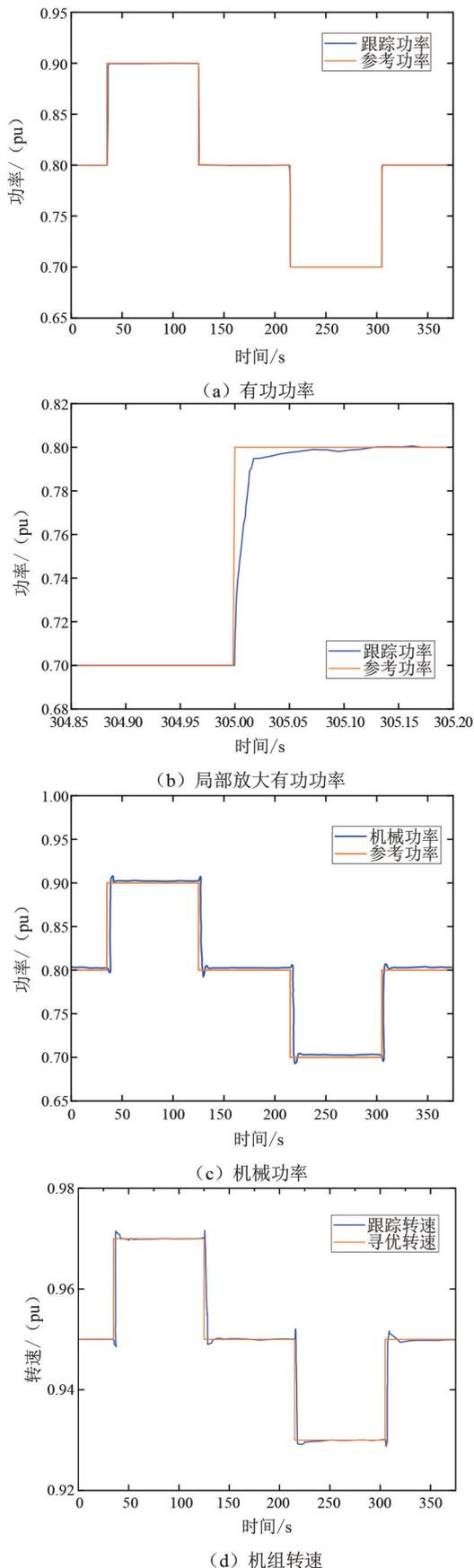
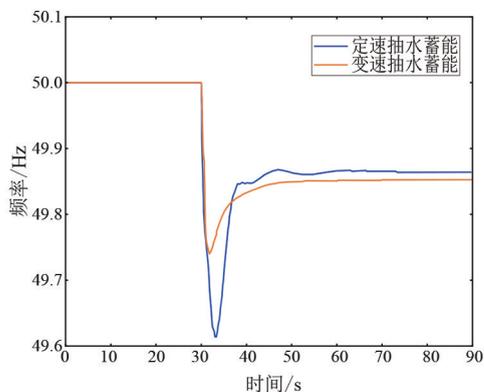


图 7 发电工况下机组跟踪参考值动态

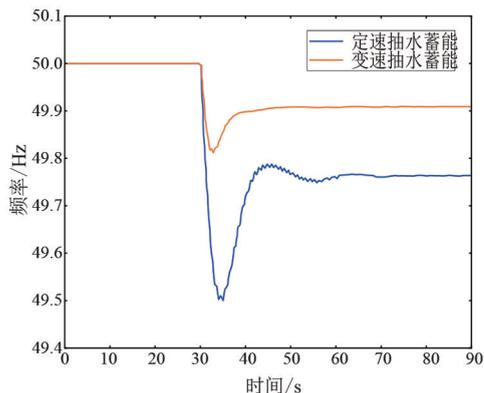
的偏移量也显示了PID调速器满足电气和机械系统的

选取的下垂控制策略是一种比例控制策略,系统中所有下垂控制发电机的响应与频率偏差成正比,而变速抽水蓄能机组的频率偏差程度较小,因此其他所有调频单元的频率响应也小于定速抽水蓄能机组,导致变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比在稳态时稳态偏差较大。

在抽水工况下,定速抽水蓄能机组的频率最低点非常低,因为定速抽水蓄能机组不参与抽水工况下的频率控制。与定速抽水蓄能机组不同,变速抽水蓄能机组在抽水工况下通过其固定的下垂系数来参与系统的一次频率调节。如图 10(b)所示,频率出现波动时,频率偏差整定为附加功率指令与系统功率指令结合,通过机侧变流器快速响应调节转子电流角速度,为系统提供快速功率支撑,能够显著抑制系统频率变化率以及减小频率下降程度,并且能够快速使系统达到稳态;在稳态时,变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比稳态偏差明显减小。此外,在图 10(a)、(b)中,都可以看到定速抽水蓄能机组能够衰减小的低频振荡。



(a) 发电工况



(b) 抽水工况

图 10 定速与变速抽水蓄能机组动态性能的比较

4 结 论

变速抽水蓄能机组控制可将频率偏差整定为有功功率的附加指令,通过双馈电机和可逆水泵水轮机协调运行完成电网的快速频率调节。在发电工况下,当电网频率出现波动时,机组将电网频率偏差整定为功率附加指令与功率指令结合,拟合出最优转速使得机组维持在最高效率运行,为系统提供快速的频率支撑;在抽水工况下,机组将电网频率偏差整定为功率附加指令与功率指令结合,通过机侧变流器快速响应控制双馈电机输出功率以满足电网需求,水泵水轮机转速根据变速抽水蓄能机组平衡运行进行调节。依据仿真结果得出:

1) 双馈变速抽水蓄能机组在不同工况下,均能快速响应频率控制指令;

2) 双馈变速抽水蓄能机组与定速抽水蓄能机组相比,在下垂系数相同的情况下能实现更好的调频效果,有效抑制系统频率变化率以及减小频率极值,使系统能更快达到新稳态,增强系统频率稳定性。

参考文献

- [1] 劳文洁, 史林军, 吴峰, 等. 计及转速及功率限制的双馈抽蓄自适应调频控制[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(1): 28-37.
- [2] 黄炜栋, 李杨, 李璟延, 等. 考虑可再生能源不确定性的风-光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 91-98.
- [3] 卢伟甫, 王勇, 樊玉林, 等. 抽水蓄能变速机组应用技术概述[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(3): 62-66.
- [4] 戴理韬, 高剑, 黄守道, 等. 变速恒频水力发电技术及其发展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 169-177.
- [5] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
- [6] 刘开培, 朱蜀, 冯欣, 等. 双馈式变速抽水蓄能电厂的机电暂态建模及模型预测控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2407-2418.
- [7] 井浩然, 李佳, 赵红生, 等. 双馈变速抽水蓄能全工况转换过程建模与仿真[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 41-50.

- [8] 邵宜祥, 纪历, 袁越, 等. 可变速抽水蓄能机组在抽水工况下的自启动方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24):125-130.
- [9] 王欣竹, 韩民晓, TESHAGER B G. 双馈式可变速抽水蓄能机组无功特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2918-2925.
- [10] JOSEPH A, CHELLIAH T R. Analysis of doubly fed asynchronous machine operating at condenser mode subjected to power converter faults [C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), December 14-17, 2016, Trivandrum, India. IEEE, 2017:1-6.
- [11] 陈亚红, 邓长虹, 武荷月, 等. 发电工况可变速抽蓄机组模式切换过程多阶段柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15):5258-5274.
- [12] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3):942-957.
- [13] 李俊辉. 可变速抽水蓄能机组发电工况一次调频特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [14] ZOU J, ZHU J Z, XIE P P, et al. Regulating short-time wind power fluctuation by variable speed pumped storage unit [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Augsut 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2020:1-5.
- [15] 罗远翔, 李鑫明, 潘超, 等. 含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):76-85.
- [16] 丁理杰, 史华勃, 陈刚, 等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备, 2021, 44(3):166-171.
- [17] 龚国仙, 吕静亮, 姜新建, 等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6):1878-1884.
- [18] 朱珠, 潘文霞, 刘铜锤, 等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2):463-474.

作者简介:

杨桂兴(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

郭小龙(1983),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定控制;

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制;

亢朋朋(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定运行与控制。

(收稿日期:2024-10-23)

(上接第31页)

- [15] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [16] YU J L, FANG J Y, TANG Y. Inertia emulation by flywheel energy storage system for improved frequency regulation [C]//2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 10-13, 2018, Singapore. IEEE, 2018:1-8.
- [17] 高翔. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [18] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11):3498-3507.
- [19] 吴天宇. 基于模糊控制理论的两区域互联电网 AGC 的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [20] 田云峰, 郭嘉阳, 刘永奇, 等. 用于电网稳定性计算的再热凝汽式汽轮机数学模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5):39-44.
- [21] LUO Y D, TIAN L J, WANG X, et al. A new coordinated control strategy of flywheel energy storage system participating in primary frequency regulation of power grid [C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I & CPS Asia), July 13-15, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020:536-544.
- [22] 丰云鹤. 储能电池参与电力系统一次调频控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [23] 马智慧. 考虑调频死区的储能参与电网一次调频控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [24] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [25] 蒋华婷. 储能系统参与自动发电控制的控制策略和容量配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [26] 隋云任. 飞轮储能辅助 600 MW 燃煤机组调频技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

作者简介:

赵康(2000),男,硕士研究生,研究方向为基于飞轮储能提升电网频率稳定性。

(收稿日期:2024-08-16)